

CURSO SOBRE "CIMENTACIONES DE PUENTES"

CEDEX. MADRID, 4 - 8 MARZO, 1996

"CIMENTACIONES EN CONDICIONES ESPECIALES"

Por: Fernando Román Buj
Dr. Ing. de C. C. y P.
Jefe de la División de
Geotecnia, Geología y Obras Subterráneas
de INTECSA

INDICE

1. RAZON DE SER DE LAS CIMENTACIONES ESPECIALES
2. RECINTOS ESTANCOS
3. PILOTES DE GRAN DIAMETRO
 - 3.1 Pilotes excavados con cuchara bivalva
 - 3.2 Pilotes excavados con cuchara de pantallas
4. ELEMENTOS PORTANTES
5. CIMENTACION MEDIANTE CAJONES
 - 5.1 Cajones Abiertos o Indios (Open well caissons)
 - 5.2 Cajones de aire comprimido (Pneumatic caissons)
 - 5.3 Cajones Cerrados (Box Caissons)

1. RAZON DE SER DE LAS CIMENTACIONES ESPECIALES¹

La estructura de un puente es un sistema organizado de elementos de manera que, trabajando conjuntamente, transmiten las cargas y acciones que actúan sobre la misma al terreno donde se asienta.

Condicionantes de todo tipo (funcionales, económicos, estéticos, etc.) conducen, en determinadas circunstancias, a estructuras en las que los apoyos estén muy separados, de tal forma que concentran en unos pocos elementos, las pilas, unas grandes cargas verticales, horizontales y momentos.

La necesidad de transmitir adecuadamente al terreno estas fuertes cargas obliga, a veces, a cimentaciones de tal envergadura, que pueden llegar a consumir una parte importante del presupuesto de la obra.

Como ocurre en otras obras de menor envergadura, la elección de la cimentación obedecerá a las condiciones particulares de cada caso en función del tipo de terreno, características resistentes y deformacionales del mismo, tipo de la estructura, etc, todo ello condicionado, por supuesto, al logro de la solución más segura y económica dentro de las posibles.

Además, las características geomecánicas del terreno interrelacionan con la tipología estructural a adoptar. Propiedades como la deformabilidad del terreno, su resistencia o su capacidad para soportar empujes horizontales influyen notablemente en dicha tipología.

A modo de ejemplo, el viaducto de Garabit, realizado por Eiffel en 1884 sobre el río Truyere en el macizo central francés, pudo adoptarse un arco biarticulado como elemento principal estructural debido a que el terreno sobre el cual se asentaba era capaz de soportar los empujes horizontales que aquél le transmitía. Un terreno menos apto para soportar acciones horizontales, posiblemente habría decantado la estructura a adoptar hacia una tipología distinta.

NOTA:

En la confección de este texto se ha contado con la colaboración de D. Juan Carlos de Cea a quien se agradece en estas líneas su colaboración.

Bajo el título de cimentaciones en condiciones especiales, incluiremos en esta conferencia dos aspectos profundamente interrelacionados:

- 1) En primer lugar, la construcción de elementos de apoyo de la estructura singulares, o no convencionales, tales como pilotes de gran diámetro, pilotes de sección rectangular o elementos portantes, cajones de diversos tipos, etc.
- 2) Y en segundo lugar, los trabajos necesarios para construir los elementos anteriores, bien en tierra firme o bien en el cauce de los ríos (mediante construcción de islas artificiales o desde pontonas), que en ocasiones también pueden considerarse como singulares o especiales.

En relación con el segundo aspecto, citemos el caso de la cimentación de algunas de las pilas del puente Lueg, en el Tirol Austríaco. Algunas de ellas debían apoyarse directamente sobre una ladera constituida por una capa superficial de esquistos alterados con síntomas de inestabilidad superficial en forma de creep, debajo de la cual, a 20 m de profundidad, aparecía la roca sana. Las zapatas de las pilas se situaron, finalmente, en la roca sana, para lo cual fue preciso realizar un pozo del orden de 10 m de diámetro (Figura 1). No fue preciso emplear ningún elemento de entibación, salvo el gunitado de su pared, con objeto de evitar una mayor alteración de los materiales.

A continuación se efectuará una descripción más o menos detallada de estos tipos de cimentaciones, así como de los trabajos que es preciso llevar a cabo, previa, durante o posteriormente a su ejecución, para hacer ésta más fácil y cómoda.

2. RECINTOS ESTANCOS

En el caso de corrientes fluviales de gran anchura o calado, en las que es preciso disponer una o varias pilas de un puente, se construyen estos recintos para crear islas artificiales a través de las cuales sea posible ejecutar de manera cómoda los elementos que constituyen su cimentación, así como el arranque de las mismas.

Una vez creada o construida la isla, se pueden plantear dos posibilidades de ejecución de los trabajos:

- a) Agotamiento del agua contenida en el interior del recinto, trabajando en seco a un nivel inferior al que se encuentra el agua en el exterior (Puente sobre el río Eo y puente sobre el río Severn (Inglaterra), por ejemplo)
- b) Relleno del recinto interior con materiales de aportación, construyendo los elementos de cimentación desde su superficie (Puente sobre el río Guadiana; Puente de Normandía)

Cuando el calado es somero puede crearse la isla, simplemente vertiendo un material granular y protegiendo sus bordes de la corriente mediante escolleras de tamaño adecuado. Es evidente que estas islas, así creadas, a veces exigen la constricción del cauce con el camino de acceso temporal para el transporte material a verter.

Si el calado es grande, generalmente estos recintos se construyen con tablestacas, consistiendo éstas en un conjunto de perfiles laminados de acero con formas especiales que, convenientemente ensamblados, dan lugar, aunque no siempre, a una superficie exterior ondulada (Figura 2).

En general, los perfiles pueden ser de dos tipos: modulares (Figura 3) o planos (Figura 4). En relación con los primeros, su utilización da lugar a diversos tipos de tablestacas: con forma de S, de U, de Z y de doble T. Los segundos se emplean, fundamentalmente, en la creación de recintos celulares, que se comentarán posteriormente.

En cualquier caso, los elementos quedan engarzados unos en otros mediante las juntas que poseen en sus extremos. Estas, además de permitir un buen guiado de los elementos adyacentes, tienen la ventaja de que son estancas.

Debido a su fácil manejo, consecuencia del reducido peso de los perfiles metálicos, a la sencillez de hinca y a la posibilidad de su extracción posterior y consiguiente reemplazo, las tablestacas son muy apropiadas para la construcción de recintos de carácter provisional.

Para su introducción en el terreno se emplean varios procedimientos de hinca: por golpeo en la parte superior de la tablestaca de una maza en caída libre, empleando martillos Diesel o por vibración.

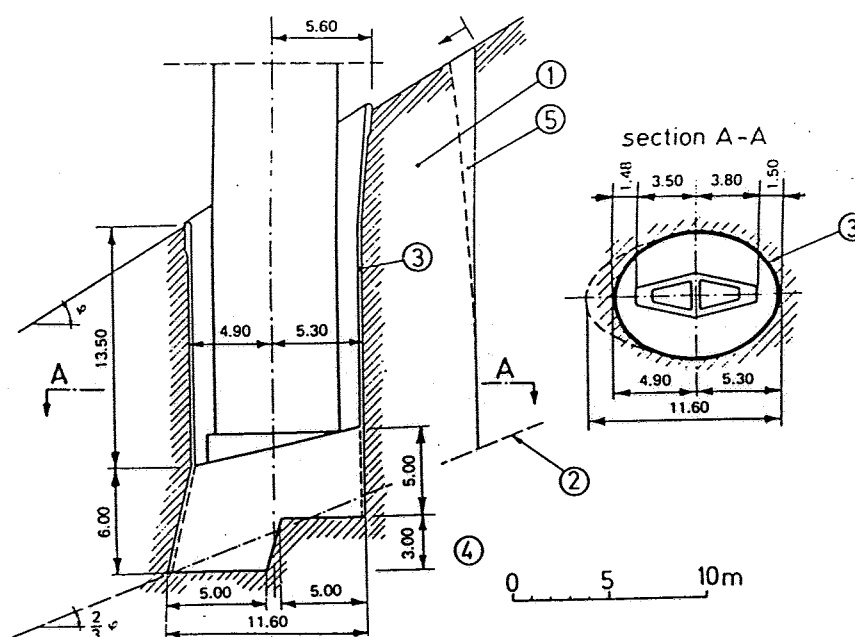


Figura 1. Esquema de los trabajos realizados para la construcción de la cimentación de algunas de las pilas del puente Lueg (Austria).

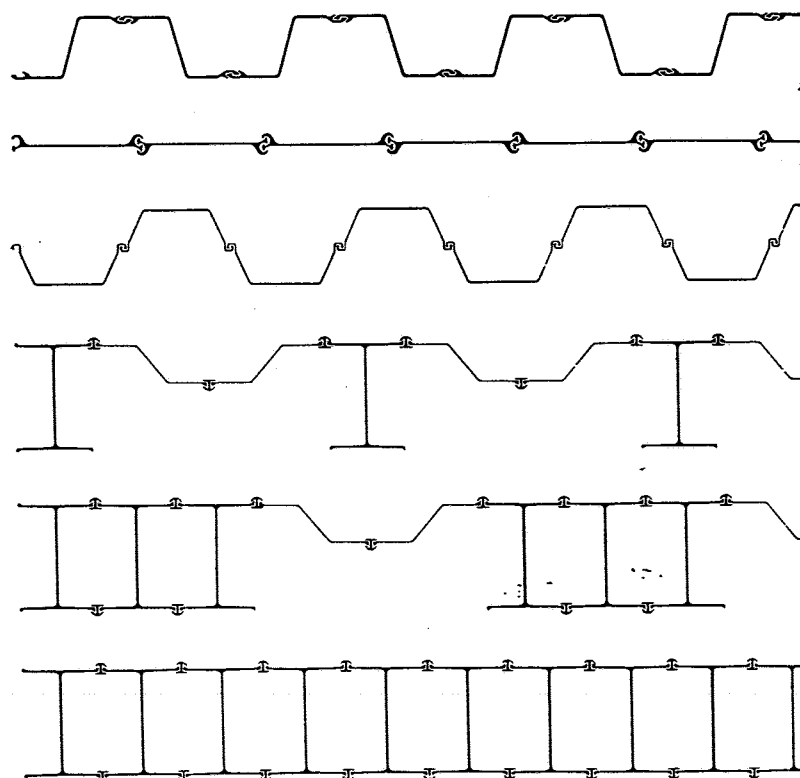
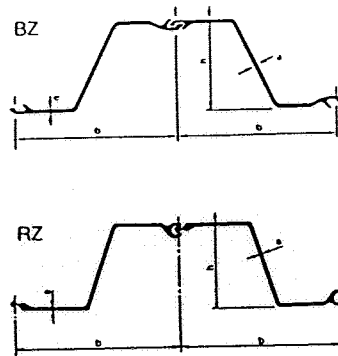


Figura 2. Diferentes formas de la superficie de una pantalla de tablestacas.

Z Profiles



U Profiles

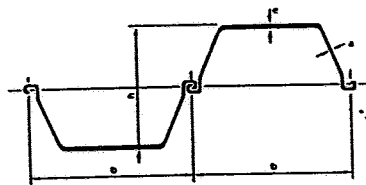


Figura 3. Tablestacas modulares.

Straight web sheet piles

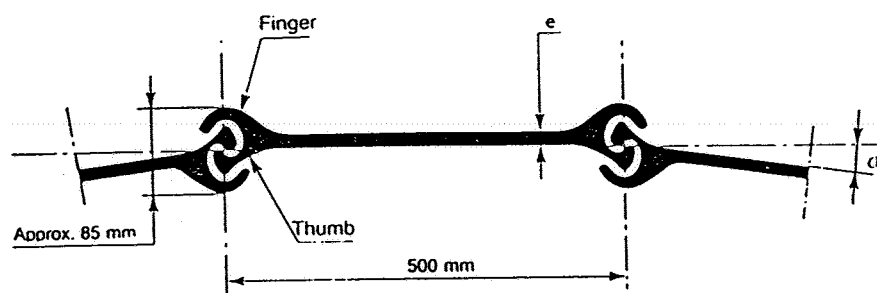


Figura 4. Tablestacas Planas

En los dos primeros casos se hace preciso el uso de un sombrerete o sufridera, con la misión de repartir la energía del golpe sobre toda la sección de la tablestaca.

El empleo más efectivo de la tablestaca se produce cuando en el perfil del terreno en el que se van a hincar existe un estrato impermeable en el cual pueden empotrarse. De esta forma, si lo que se quiere posteriormente es agotar el agua contenida en el recinto, la presencia del estrato impermeable impide, o reduce notablemente, la entrada de agua por el fondo, permitiendo construir la cimentación y parte de la pila en seco.

Combinando perfiles simples y aprovechando la rigidez conseguida tanto por el efecto forma como por relleno con materiales granulares, pueden crearse recintos de forma cualquiera, los cuales ofrecen una protección estable e impermeable para la realización en su interior de obras de excavación o cimentación. A estos recintos se les denomina habitualmente en la práctica ingenieril como ataguías celulares, y se han empleado con mucha frecuencia en la construcción de puentes que cruzan ríos caudalosos o de gran anchura: Sena (Puente de Normandía), Rhin, Danubio, etc.

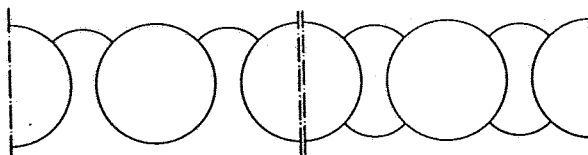
En la figura 5 se han recogido algunos de los recintos más usuales que pueden realizarse en la práctica. Disposiciones similares a las incluidas en la figura, pueden encontrarse en los catálogos de las casas que comercializan este tipo de elementos.

La elección entre uno u otro tipo de disposición debe hacerse sobre bases funcionales y económicas. En el caso que nos ocupa, para su empleo en la cimentación de puentes, suele ser frecuente el empleo de celdas de diafragmas en el caso de corrientes de calado moderado, empleándose las celdas circulares para calados importantes. Cuando los calados son muy grandes, deben utilizarse las ataguías en trébol, pero, en general, su construcción es tan complicada que suele ser preferible el empleo de celdas circulares con perfiles de alta resistencia.

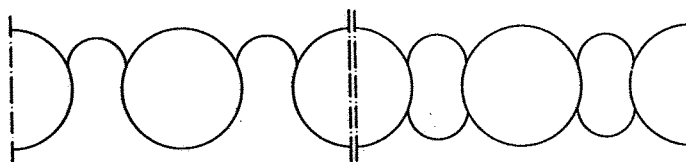
En la figura 6 se muestra el perfil de la isla artificial construida, mediante la técnica de tablestacas, para la ejecución de la cimentación y de las pilas del puente internacional sobre el río Guadiana. De la misma manera, en la foto de la figura 7 puede verse el recinto de tablestacas creado con el mismo propósito en el río Eo.

Por último, en las figuras 8 y 9 se muestran otras dos posibilidades de efectuar recintos estancos. En la primera de ellas se muestra la forma en la que se construyeron

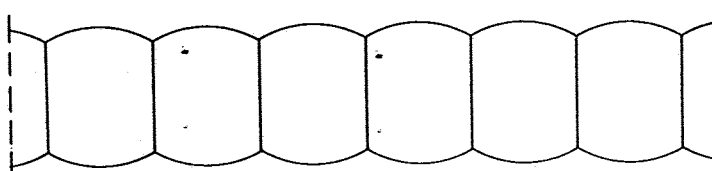
Circular cells with 90° junction piles and one or two connection arcs.



Circular cells with 45° junction piles and one or two connection arcs.



Diaphragm cells with 120° junction piles.



Cloverleaf cells with 120° junction piles.

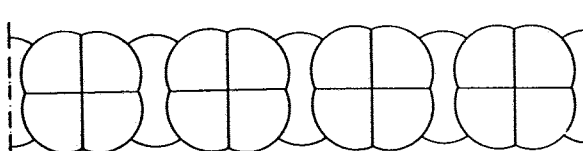


Figura 5. Diseños de recintos celulares.

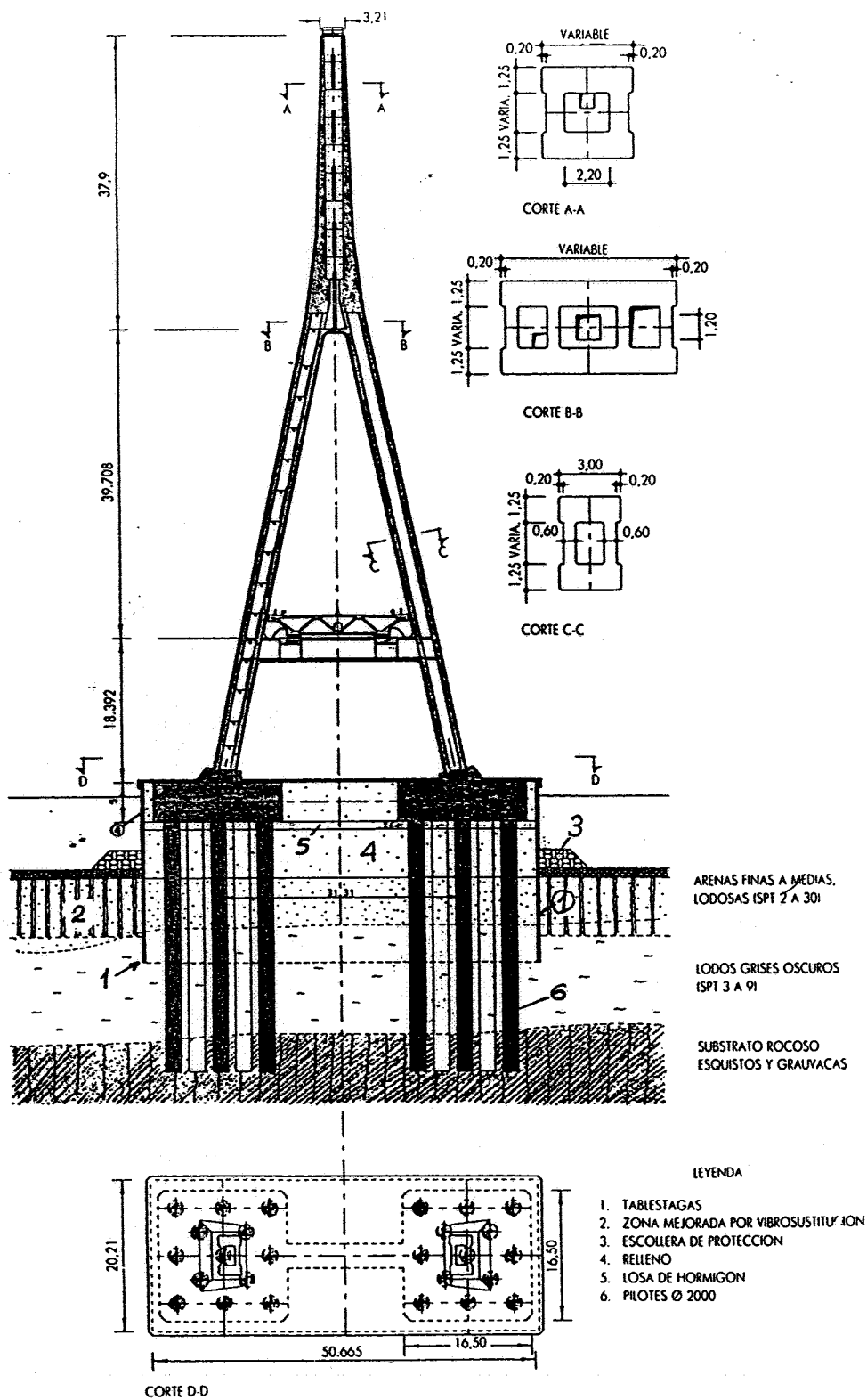


Figura 6.

Esquema de la ataguía construida para la ejecución de la cimentación del Puente Internacional sobre el río Guadiana.

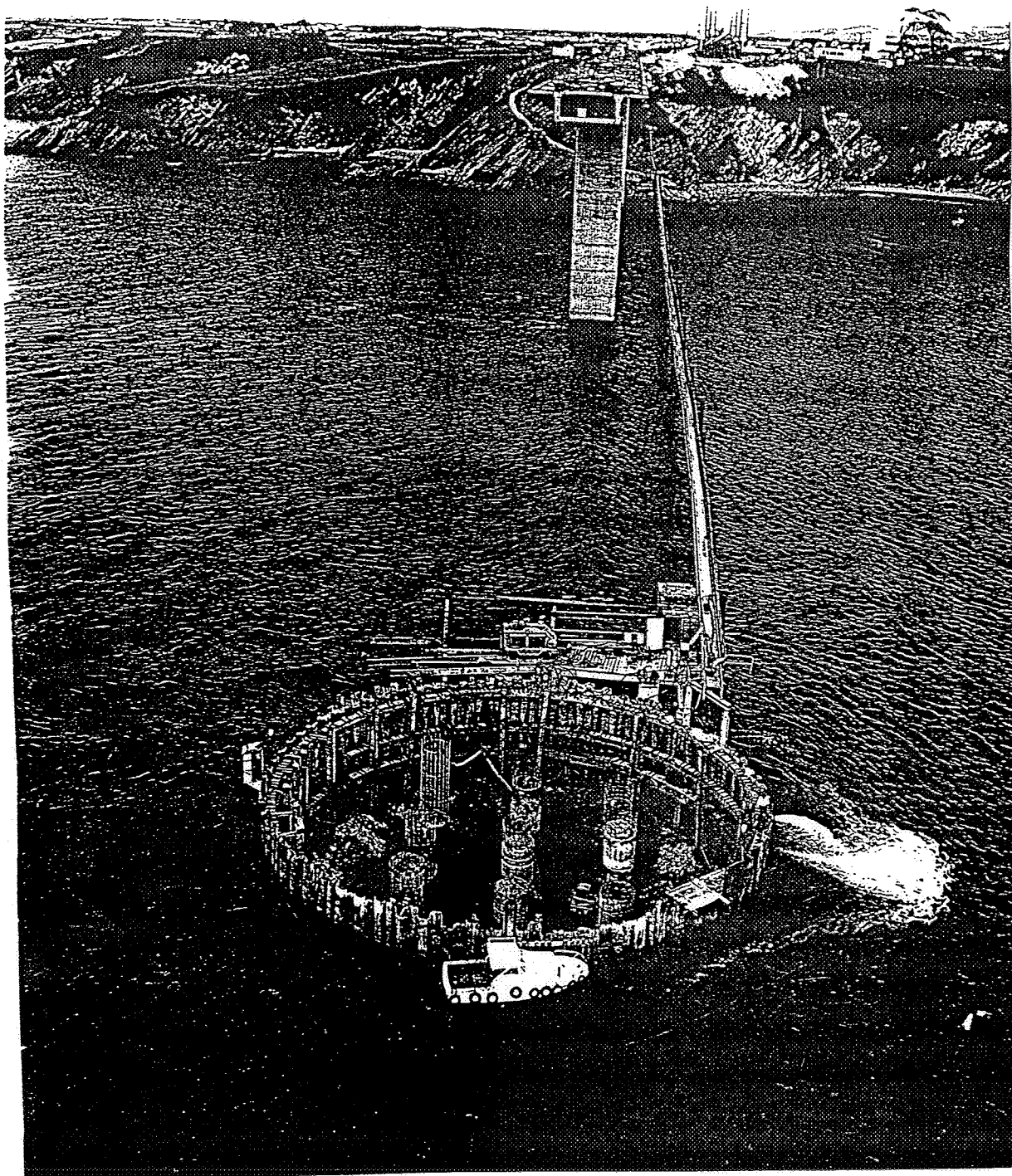


Figura 7. Recinto tablestacado construido para la ejecución de la cimentación del Puente de los Santos (Río Eo).

la cimentación y los arranques de las pilas del puente que une las islas Sjaelland y Falster en Dinamarca. El recinto estanco se consiguió, una vez creada la plataforma de hormigón en el fondo, mediante la superposición de anillos metálicos, consiguiéndose la impermeabilidad entre los mismos con el empleo de juntas de neopreno. En la segunda figura se muestra el recinto en forma de cajón creado para la construcción de la cimentación y pilas de otro puente. El cajón, de hormigón, una vez fondeado en su situación definitiva permitía efectuar en seco las labores de construcción de los pilotes de cimentación. La única precaución a tener en cuenta durante la realización de estas labores, consistió en efectuar un adecuado sellado del espacio anular creado entre los pilotes y el fondo del cajón para evitar la entrada de agua a su interior.

3. PILOTES DE GRAN DIAMETRO

Es muy frecuente que cuando un puente tiene que cruzar un río o un valle de gran anchura, el proyecto intenta la mayoría de las veces que la luz entre apoyos sea lo más grande posible, lo que implica unas cargas de éstos al terreno muy elevadas.

En aquellos casos en los que la estructura tiene un grado de hiperestatismo elevado y el terreno no es excesivamente competente, lo que hace inviable la solución de cimentación directa, el proyectista necesita buscar un estrato duro en el interior del perfil estratigráfico del terreno al que transmitir las cargas, lo que frecuentemente le obliga a acudir a pilotes de gran diámetro, entendiendo por éstos aquellos pilotes que presentan un diámetro igual o superior a 1 m.

Si el diámetro del pilote es inferior a 1.0 m, puede acudir para su ejecución al empleo de equipos convencionales, mientras que si es superior al metro, es preciso acudir a equipos de ejecución y técnicas de excavación singulares.

La perforación de estos pilotes de gran diámetro puede llevarse a cabo de las dos siguientes formas:

- Si el diámetro está comprendido entre 1 y 2 m, con la ayuda de cucharas bivalva
- Si el diámetro es mayor de 2.5 m, con la ayuda de cucharas de las empleadas en la excavación de pantallas continuas.

3.1 Pilotes excavados con cuchara bivalva

La ejecución de este tipo de pilotes, suele pasar en la práctica por la realización de las siguientes fases (Figura 10).

En primer lugar, para el centrado del pilote, se excava un antepozo con cuchara bivalva, introduciendo a continuación el primer tramo de la tubería de revestimiento, la cual se hince en el terreno. Las posibilidades de hince son varias, empleándose cada vez con más frecuencia el sistema conocido como collar hidráulico u oscilador.

Simultáneamente a la hince se va efectuando la excavación con cuchara del interior de la entubación. En este sentido, suele ser regla frecuente llevar la base de la entubación, aproximadamente 1.5 - 2 m por delante del fondo de excavación, lo cual evita en ocasiones la rotura del fondo.

Terminada la introducción del primer tramo, se coloca el siguiente soldándolo al anterior y se continua con el proceso de excavación.

Si el pilote tiene una gran longitud, y una gran parte de la misma está por debajo del nivel freático, puede ser necesario el empleo de lodos bentoníticos, teniendo la precaución de que su nivel superior dentro de la entubación esté por encima del freático del orden de 1.5 m. De esta manera se reduce notablemente el peligro de roturas o sifonamientos.

Cuando la perforación encuentra un estrato duro, o cuando se alcanza el paquete en el que deben empotrarse los pilotes, puede ser necesario el empleo del trépano, extrayendo el material fracturado con ayuda de la cuchara.

Una vez terminada la perforación, un aspecto primordial para el adecuado comportamiento futuro de los pilotes, es el de la limpieza de la punta, a través de la cual se transmitirá una gran parte de la carga de la estructura al terreno natural.

En primer lugar se procede a una limpieza mecánica exhaustiva con una cuchara especial, cuyo cierre está preparado para impedir la pérdida de material en la maniobra de ascenso, y acto seguido se aplica el sistema denominado air-lift.

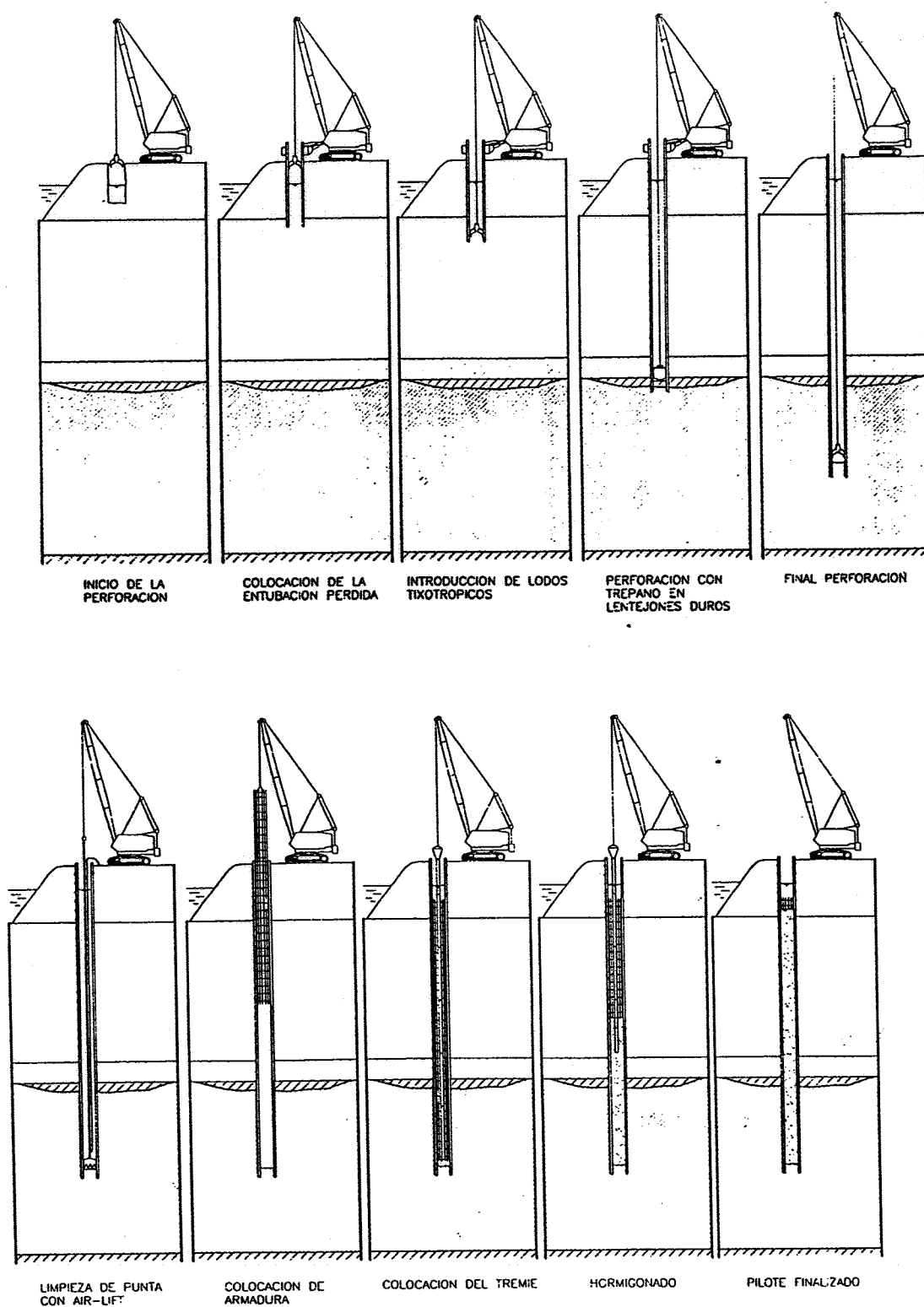


Figura 10.

Esquema de ejecución de un pilote con cuchara bivalva.

La única diferencia de la ejecución de estos pilotes con respecto a la que se ha comentado en el apartado anterior consiste normalmente en el tamaño de la cuchara a emplear, ya que las paredes de la excavación pueden sostenerse también mediante lodos o empleando una entubación recuperable.

Una situación como la que venimos comentando se produjo en el proyecto de dos puentes hiperestáticos sobre el nuevo cauce del río Turia en Valencia. Debido al tipo de terreno existente y a las fuertes cargas que debía transmitir la estructura a la cimentación, los proyectistas consideraron varias posibilidades, eligiendo por razones de plazo y económicas la solución de cimentar cada pila mediante un único pilote de 2.600 mm de diámetro (Sistema Pila-Pilote).

Para poder perforar un pilote de esas dimensiones se optó por el empleo de una cuchara bivalva de 2.60 m de apertura y 1.0 m de anchura de las que se emplean habitualmente para construir módulos de pantalla.

Previamente al inicio de la excavación se construyó en todo el perímetro del pilote un murete guía de 0.5 m de espesor y 2.0 m de altura.

La sección del pilote se excavó colocando en tres posiciones distintas la cuchara (Figura 12), reperfilando posteriormente las paredes de la perforación con un útil construido a tal efecto.

Finalizada la excavación del pilote se seguía la misma secuencia de operaciones que ha sido comentada en el apartado anterior: limpieza de la perforación mediante el sistema air-lift, colocación de armaduras y hormigonado posterior del pilote.

La situación y calidad del hormigón de la punta de los pilotes así como del terreno subyacente se comprobó mediante sondeos, utilizando para ello como guía un tubo metálico de 90 mm de diámetro adosado a la armadura, con su base 1 m por encima de la cota punta de los pilotes.

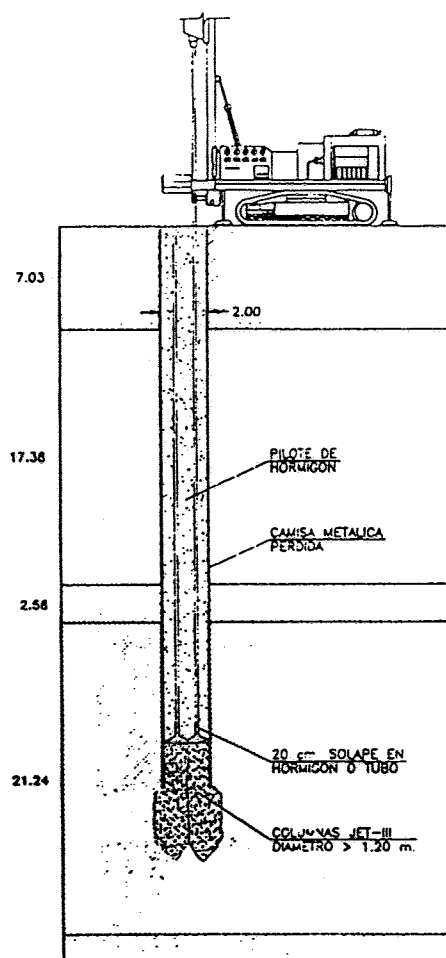


Figura 11. Tratamiento mediante Jet-Grouting de la punta de un pilote.

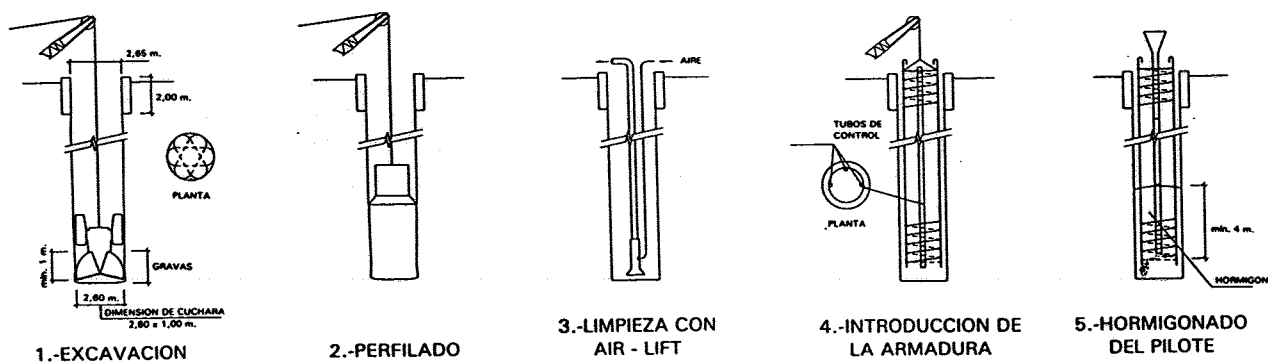


Figura 12. Esquema de ejecución de un pilote con cuchara de pantallas.

4. **ELEMENTOS PORTANTES**

Los elementos portantes son pilotes de grandes dimensiones contruidos con la técnica de los muros pantalla. Algunas casas comerciales también los denominan pilotes planos o en cruz, de acuerdo con la forma que presenta su sección. En el fondo, no es más que el paso intermedio en la solución descrita en el apartado anterior, acerca de los pilotes del puente sobre el nuevo cauce del río Turia.

Como consecuencia, este tipo de elementos pueden emplearse en sustitución de otros tipos de cimientos convencionales (grupos de pilotes, cajones, etc).

Su ejecución es muy simple (Figura 13):

- a) En primer lugar se construyen los muretes guía, los cuales cumplen tres importantes misiones: conducen a la cuchara en el comienzo de la excavación; estabilizan la parte superior del terreno, y; permiten la suspensión de la armadura previamente al hormigonado del elemento
- b) se comienza la excavación con cuchara bivalba, estabilizando la pared de la perforación con lodos
- c) se coloca la armadura procurando que su extremo inferior quede a 20 ó 30 cm del fondo de la excavación
- d) y finalmente se hormigona el elemento mediante tubo Tremie recuperándose los lodos que rellenan la perforación.

Como se desprende del esquema anterior, las dimensiones de la sección deben adaptarse a los equipos de excavación existentes. En este sentido, la dimensión menor del elemento suele estar comprendida entre 0.45 y 1.0 m, mientras que la mayor puede variar entre 1.8 y 2.5 m.

Las profundidades ejecutadas llegan con facilidad a los 20 - 30 m, aunque pueden alcanzarse profundidades mayores, habiéndose llegado en algún caso los 100 m.

Pueden construirse con cualquier sección, como por ejemplo, en forma de H, X, T, L, U, segmentos de círculo, etc. A modo de ejemplo, en la figura 14 se encuentran representadas algunas de las disposiciones más corrientemente empleadas en la práctica.

Una importante aplicación la encuentra en la cimentación de estructuras sometidas a grandes esfuerzos horizontales.

En la figura 15 se muestra la cimentación del puente del V Centenario de Sevilla empleando este tipo de elementos. El perfil estratigráfico del terreno se encuentra representado en la figura 16.

La solución de cimentación prevista en el proyecto para las pilas principales era la de pilotes de 2 m de diámetro de una longitud de aproximadamente 56 m, que se empotraban en las conocidas margas azules del Guadalquivir. Sobre éstas existe un lecho de gravas densas de variable espesor y sobre el que es frecuente que se cimenten las estructuras pesadas de la ciudad de Sevilla.

Debido a las dificultades para conseguir los equipos de pilotaje necesarios para adaptarse al ritmo de ejecución previsto por las especiales circunstancias del auge de obras propiciada por la EXPO'92, y por la reducción de plazos netos que podía conseguirse, se llevo a cabo una solución de variante, consistente en la ejecución de elementos portantes de pantalla de 2.50x0.8 m, que se apoyaban en todos los casos en el estrato de gravas, incluso en los apoyos de las pilas principales, incrementando la sección portante. Asimismo, se incluían tubos de PVC adosados a las armaduras de los módulos, que permitían, una vez finalizados, sondear la punta y efectuar un lavado y posterior inyección de la totalidad de los elementos portantes en contacto con las gravas.

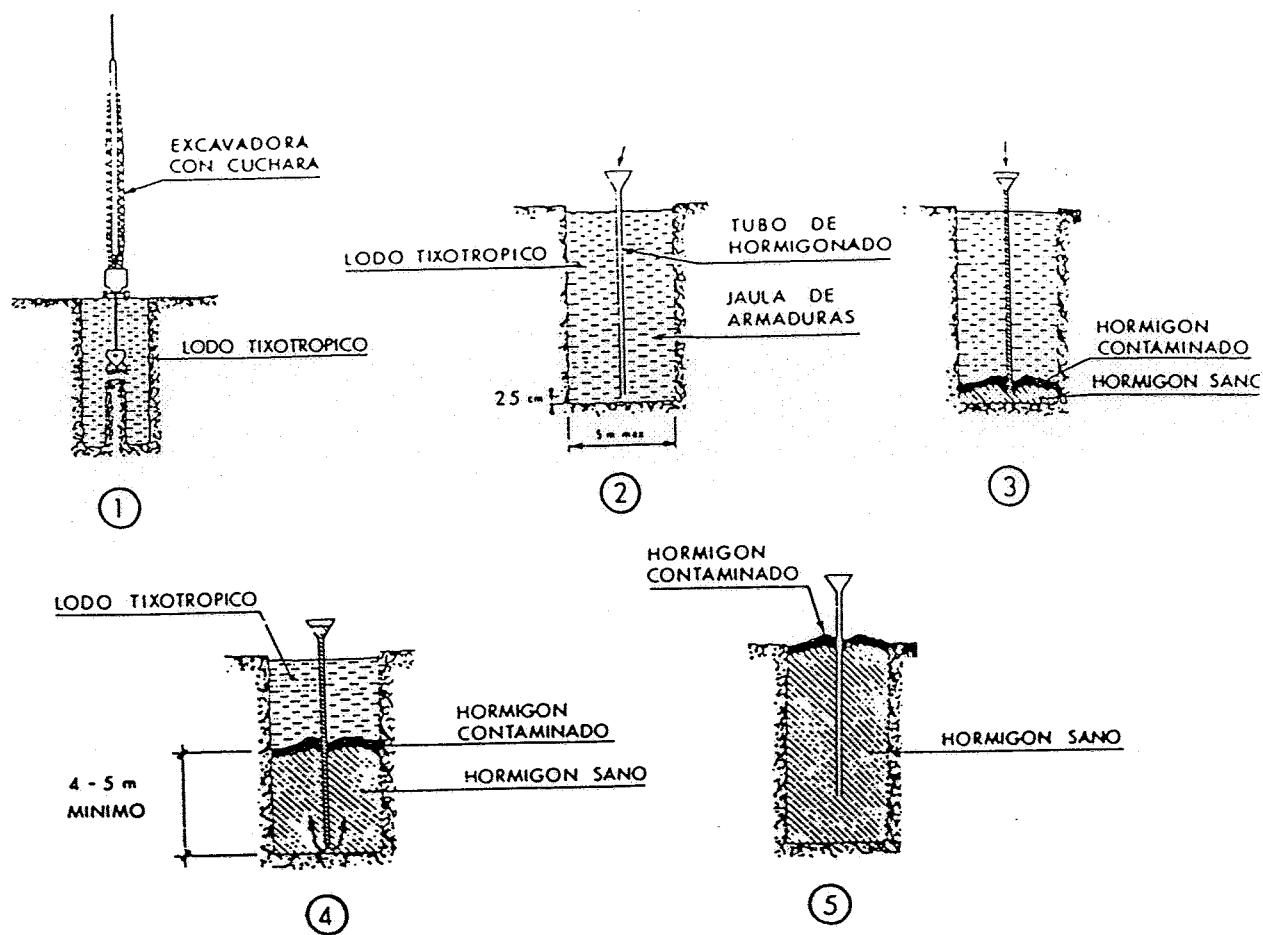


Figura 13. Esquema de ejecución de elementos portantes.

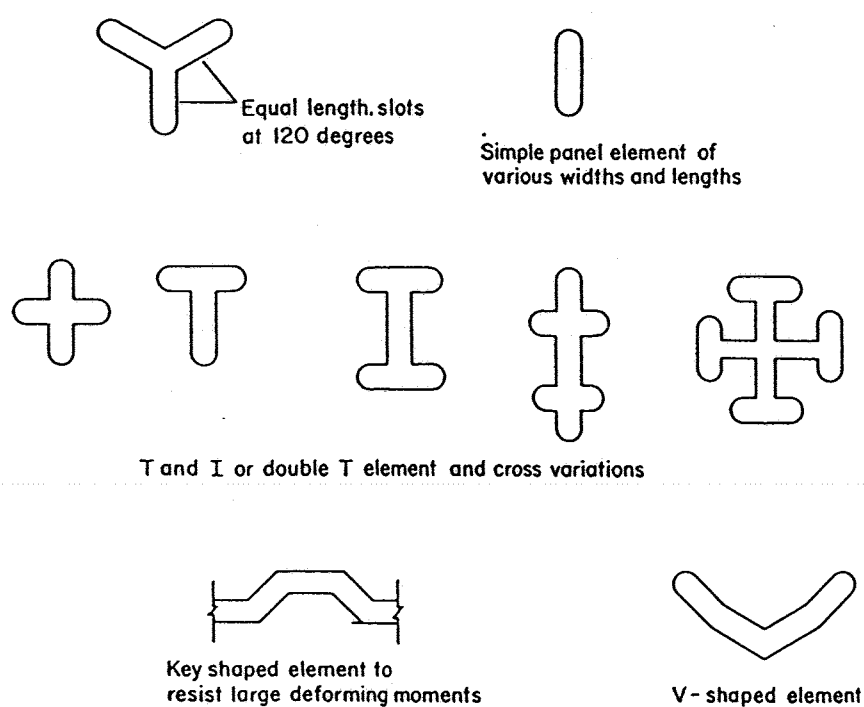


Figura 14. Diferentes disposiciones de elementos portantes.

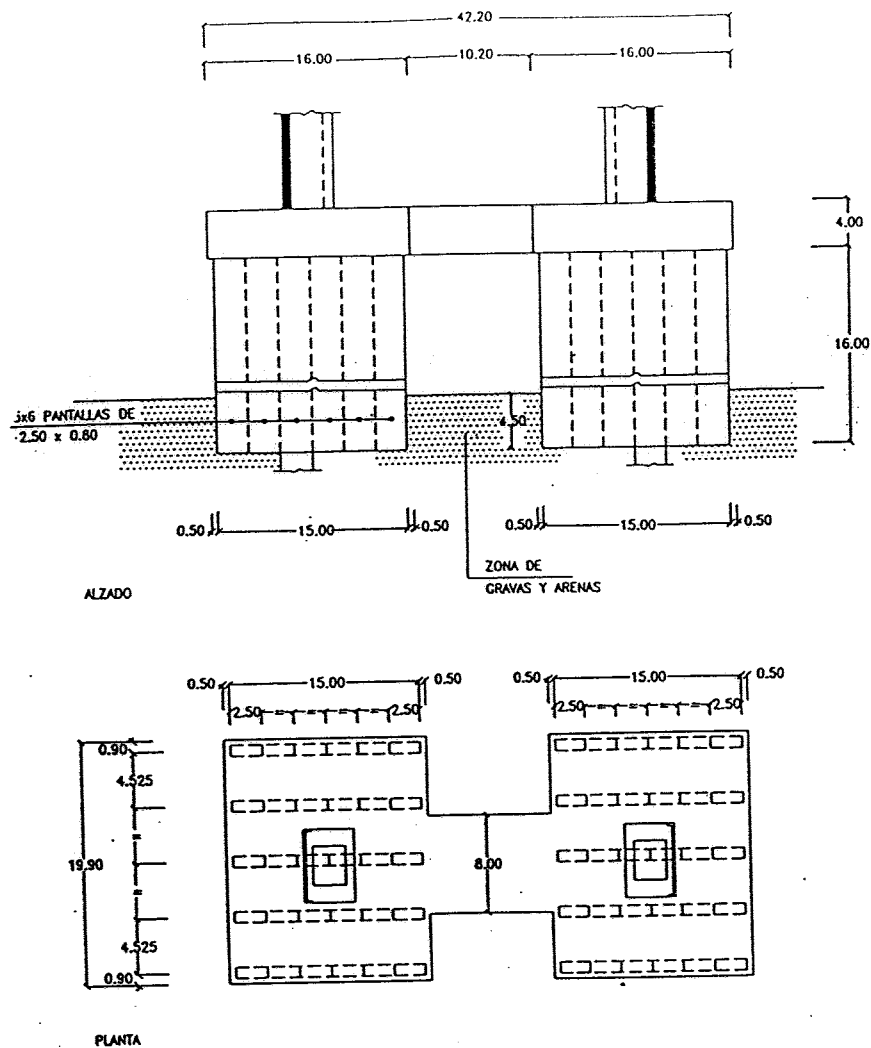


Figura 15. Cimentación de las pilas principales del Puente V Centenario (Sevilla) mediante elementos portantes.

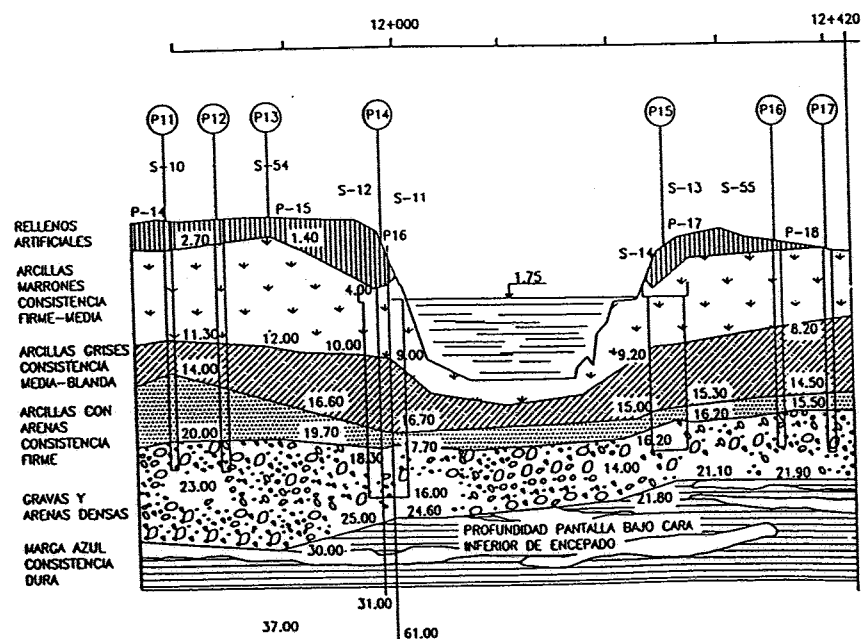


Figura 16. Perfil estratigráfico del terreno.

5. CIMENTACION MEDIANTE CAJONES

Podemos distinguir tres diferentes tipos de cajones de cimentación de pilas de puentes:

- Cajones abiertos o Indios (Open well caissons)
- Cajones de aire comprimido (Pneumatic caissons)
- Cajones cerrados (Box Caissons)

5.1 Cajones Abiertos o Indios (Open well caissons)

Este procedimiento de cimentación, hasta hace relativamente poco tiempo muy empleado en el campo de los puentes, en la actualidad, con la aparición de los pilotes de gran diámetro, prácticamente no se utiliza.

El sistema fue creado en la India, de ahí el nombre, y consiste en la hinca de un cajón, con su borde inferior biselado o con forma de cuchilla, que se va construyendo a medida que progresa la excavación del material que va quedando encerrado en su interior; en algunos casos el cajón se "presenta" antes de su hinca totalmente construido. Es evidente que su utilización está emparejada con la presencia de suelos blandos o fácilmente excavables.

Los materiales constituyentes de estos cajones son muy variados, habiéndose construido con ladrillos, madera, palastro y acero, elementos prefabricados, hormigón, etc. Nos referiremos exclusivamente a los construidos con hormigón.

En cuanto a la forma en planta y distribución interior de los mismos, pueden dividirse en unicelulares (de sección circular, cuadrada o rectangular) o multicelulares.

En las figuras 17 y 18 se muestran, respectivamente, algunos perfiles transversales de este tipo de cajones, así como de los diferentes tipos de cuchillas que pueden construirse en el borde inferior del primer elemento. A veces, dependiendo de la naturaleza del terreno a atravesar, puede sustituirse este último por una estructura metálica, construyendo los siguientes de hormigón.

El sistema de construcción mediante este sistema es muy sencillo. En efecto, se construye el primer tramo y se excava su interior, introduciéndose en el terreno por el peso del siguiente (Figura 19).

Suele ser frecuente construir los tramos posteriores al primero, con unas dimensiones externas más reducidas, con objeto de rebajar los rozamientos laterales y los empujes del terreno sobre los mismos, facilitando así la hinca. También se han empleado técnicas de impregnación con ciertos productos para alcanzar el mismo objetivo.

En general se produce siempre un cierto aflojamiento del terreno situado alrededor del cajón, por lo que se excavará un volumen mayor del teóricamente encerrado en el mismo.

El comienzo de la hinca es el momento más delicado y siempre requiere una atención especial. Las inclinaciones deben ser corregidas de inmediato. La manera más sencilla de efectuar estas correcciones consiste en excavar en el lado que se ha quedado más alto, vertiendo los materiales en el lado opuesto. Una vez que el cajón queda nivelado y bien empotrado en el terreno, más fácil es su guiado posterior.

La excavación puede realizarse manual (raramente), mecánica, empleándose en este último caso una cuchara, o hidráulicamente por la inyección de agua a presión y aspirando con bomba. Eventualmente puede ser necesario el empleo de trépano para atravesar terrenos duros.

En este último caso, aunque se consiga romper el terreno, el situado debajo de las cuchillas impedirá el descenso natural del cajón. Si éste, por su propio peso, no es capaz de romperlo, será preciso acudir a técnicas especiales, como por ejemplo, emplear explosivos, efectuar un tapón en su interior y emplear aire comprimido, o bien rebajar el nivel de agua en su interior para disminuir las tensiones efectivas bajo las cuchillas en el fondo del cajón.

Una precaución a tener en cuenta cuando se está excavando por debajo del nivel freático, es que el nivel de agua en el interior del cajón se mantenga por encima de éste, ya que de lo contrario puede producirse un sifonamiento del fondo o arrastres, con los consiguientes desvíos e inclinaciones.

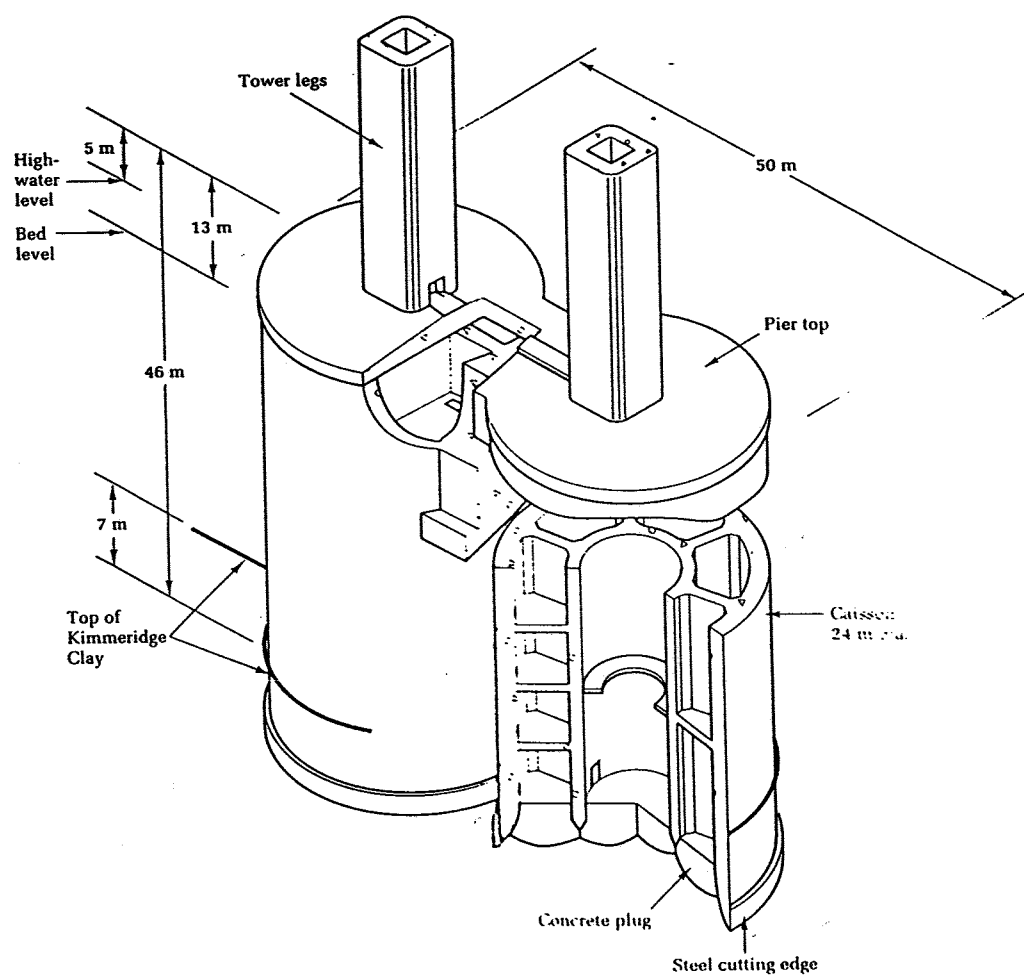
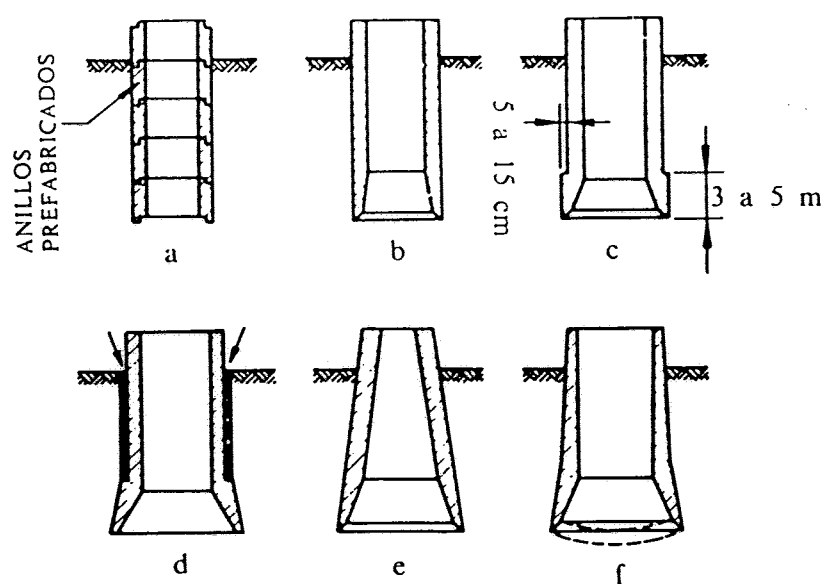


Figura 17. Secciones verticales de cajones indios.

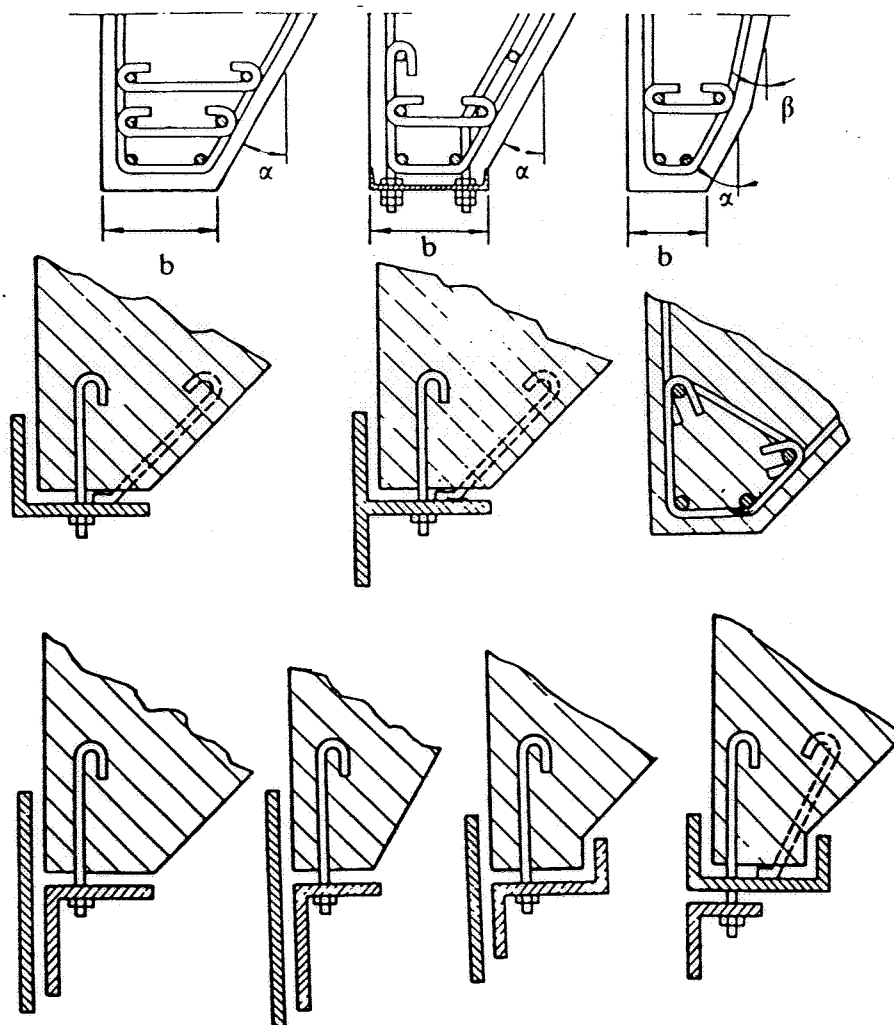


Figura 18. Formas de cuchillas y esquemas de armado de las inmediaciones.

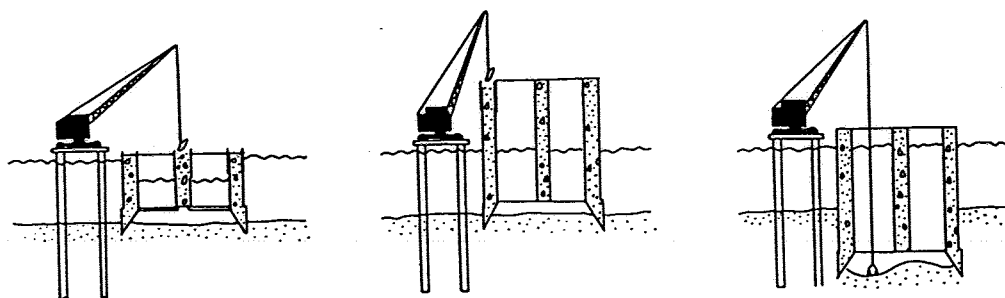


Figura 19. Proceso de construcción e hincia de un cajón indio.

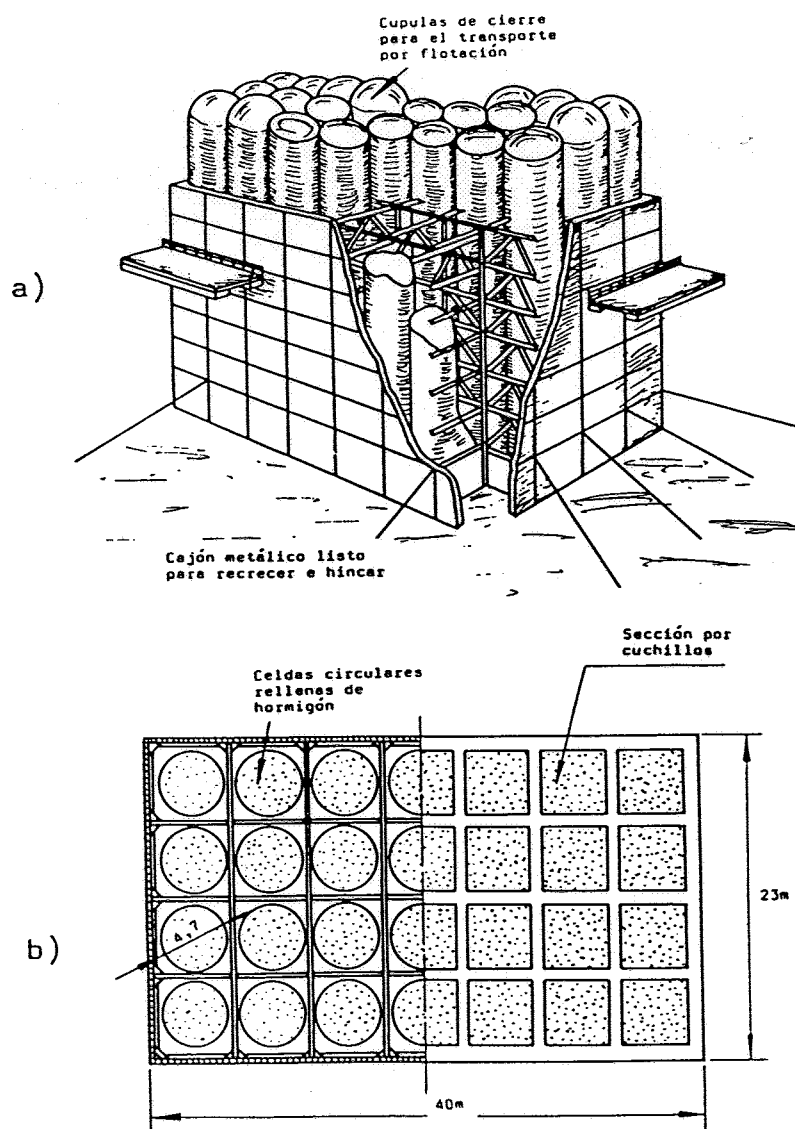


Figura 20. Esquema de los cajones indios empleados como cimentación de las pilas principales del puente sobre el Tajo a su paso por Lisboa.

Una vez alcanzado el nivel de cimentación, se sella el fondo del cajón con un tapón de hormigón, rellenando posteriormente los huecos interiores con hormigón, arena, grava, o cualquier peso muerto.

En el caso de querer hincar un cajón de este tipo en aguas libres, puede hacerse de las dos formas siguientes. La primera, creando previamente una plataforma artificial de trabajo con alguna de las técnicas que se han visto en el apartado 2, hincándolo posteriormente desde su superficie. O bien construir el cajón, dentro del agua, cerca de la orilla, llevarlo flotando al lugar de su ubicación definitiva, fondearlo y comenzar las labores de excavación.

Con este último procedimiento se construyeron -con un error en planta de centímetros- los grandes cajones de las pilas centrales del puente sobre el Tajo, en Lisboa (Figura 20). Estos cajones, de 40x23 m de sección en planta, atravesaban 32 m de agua, 30 m de fango y 20 m de arenas y piedras sueltas, hasta alcanzar el basalto en el que se apoyaban, a 82.5 m de profundidad.

5.2 Cajones de aire comprimido (Pneumatic caissons)

Al igual que los cajones indios, actualmente es muy escaso su empleo.

Cuando el terreno a excavar es muy permeable o muy flojo, puede suceder que no sea posible hincar un cajón del tipo de los comentados en el apartado anterior, debido al posible sifonamiento del fondo de la excavación.

En estos casos puede recurrirse a realizar esta última auxiliándose de aire comprimido para expulsar el agua del recinto interior que envuelve el cajón.

Una descripción de sus partes más fundamentales puede verse en la figura 21.

Mediante este procedimiento es posible acceder directamente al fondo para vencer ciertos obstáculos durante el proceso de hincia, como pequeños estratos de roca, presencia de bolos, difíciles de solucionar con el procedimiento "ciego" del cajón indio, asegurando además una limpieza correcta del fondo de la excavación.

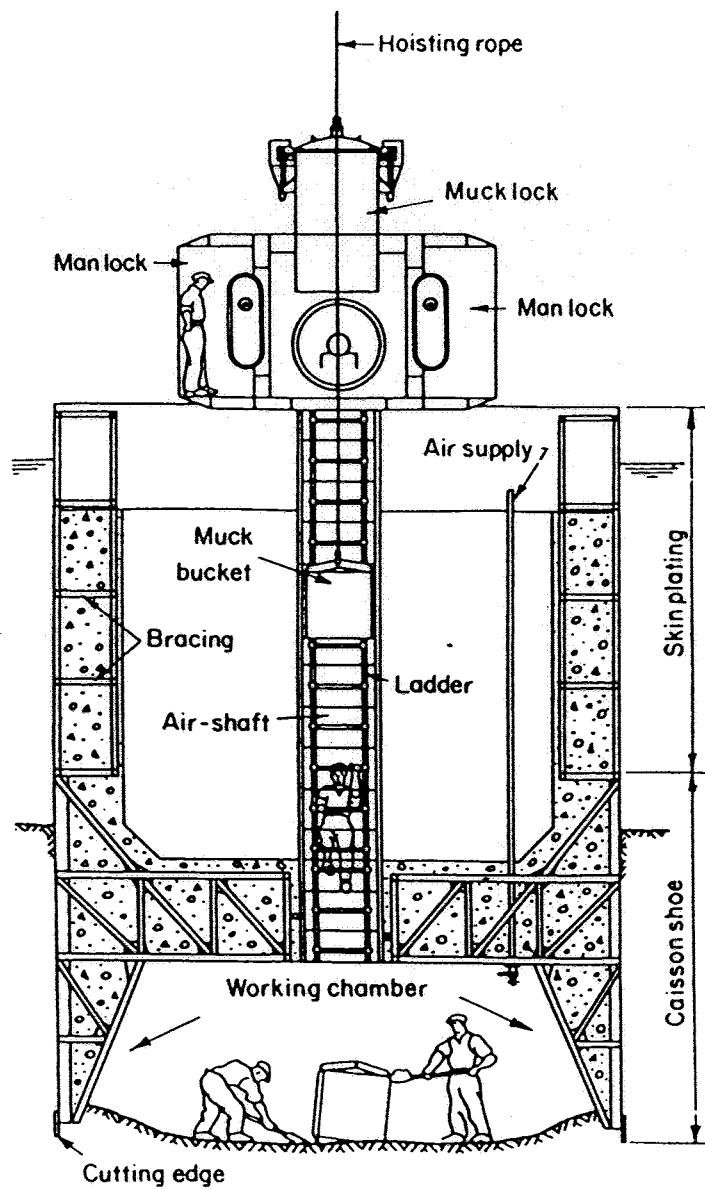


Figura 21. Partes fundamentales de un cajón de aire comprimido.

El esquema de construcción de un cajón de estas características es casi igual que el anterior, la única diferencia se produce en la forma en la que se lleva a cabo la excavación. Esta se realiza manualmente, dentro de la cámara de trabajo, en la cual se introduce aire a presión para evitar la entrada del agua por el fondo de la excavación, así como los levantamientos de ésta.

Por necesitarse la presencia de equipos humanos en el interior del cajón, son más robustos y tienen paredes mas anchas que los cajones tratados en el apartado anterior, con la idea de que aún produciéndose un hundimiento del cajón, la altura libre de la cámara no sea inferior a la de un hombre.

Una vez alcanzado el fondo de la excavación se hormigona la cámara, así como un cierto espacio por encima de la misma.

Su principal inconveniente radica en que no es posible alcanzar profundidades importantes (mayores de 30 m), ya que el cuerpo humano no es capaz de soportar presiones superiores a los 3 kg/cm² e, incluso, para presiones menores, las condiciones de trabajo están lógicamente limitadas.

Un ejemplo de cimentación realizado con esta técnica, es el de las pilas principales del puente Fray Bentos, en Uruguay, que se efectuó hincando cuatro cajones individuales cilíndricos, de 10 m de diámetro, cuyo primer tramo estaba formado por una cuchilla metálica de 2.50 m de altura. Cada cajón se construía al mismo tiempo que se mantenía a flote, y una vez situados los cuatro se arriostraban sus cabezas mediante una losa a modo de encepado.

En la figura 22 se muestra esquemáticamente el proceso de construcción e hincada de cada uno de los cajones.

La profundidad de hincada llegó en algún caso, a 25 m dentro del terreno, hasta alcanzar su base; y la máxima presión de trabajo dentro de la cámara fue de 2.8 kg/cm².

En el puente sobre el río Torridge, en Inglaterra, también se empleo este sistema para la construcción de la cimentación de las dos pilas principales. La hincada de los cajones se efectuó en dos fases. En la primera, los cajones se introducían en el terreno por su propio peso, tal y como se ha visto en el apartado anterior, hasta una profundidad

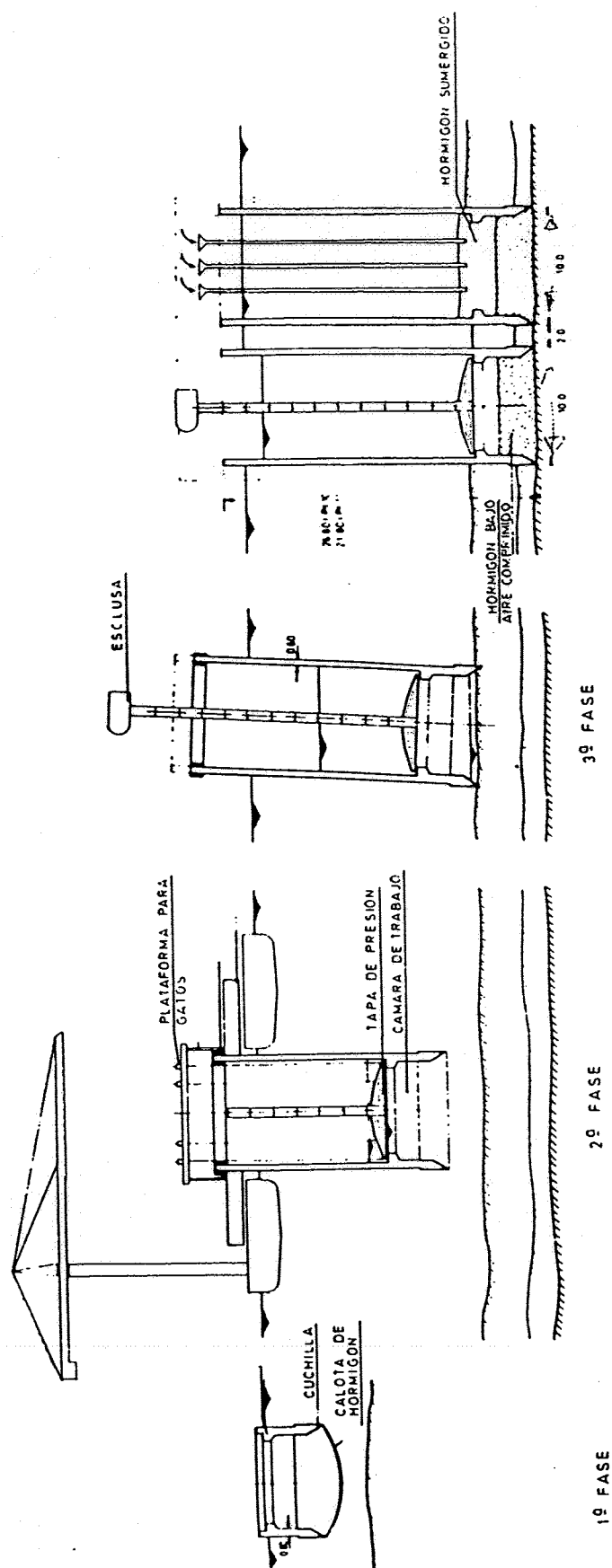


Figura 22. Fases de construcción e hincia de los cajones empleados como cimentación de las pilas principales del Puente Fray Bentos (Uruguay).

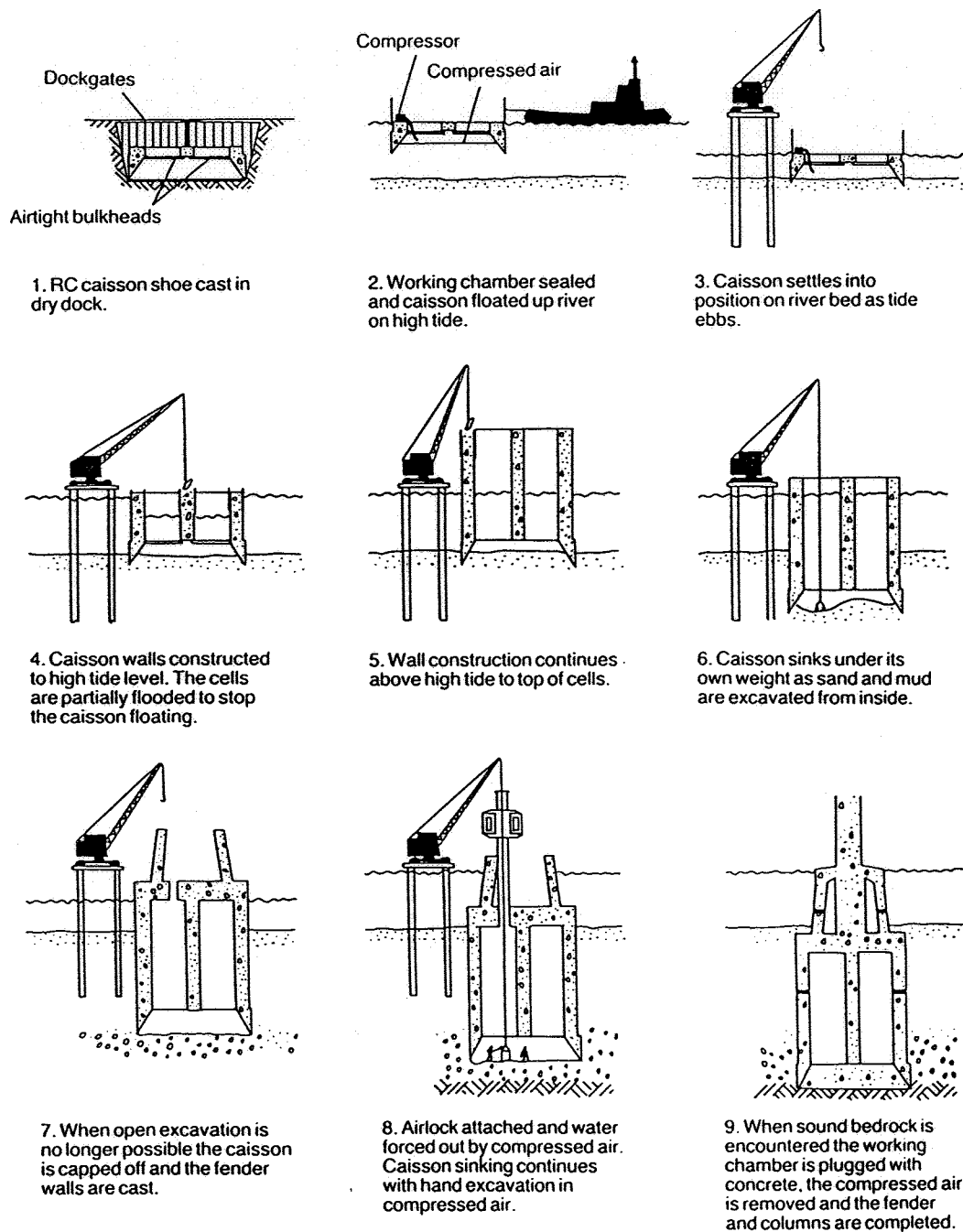


Figura 23. Fases de construcción e hinca de los cajones empleados como cimentación de las pilas principales de un puente sobre el río Torridge (Inglaterra).

tal que no progresaba el proceso de hinca. A partir de este momento, 2ª fase, se continuaba la excavación con la ayuda de aire comprimido (Figura 23).

5.3 Cajones Cerrados (Box Caissons)

Estos cajones, al contrario que todos los anteriores, disponen de un fondo plano cerrado.

Suelen ser de forma rectangular y de tipo multicelular, siendo la sección de las celdas rectangular, cuadrada o circular, dejándose en la losa del fondo, en su parte inferior y perimetralmente, un diente que facilita el "encaje" con el terreno en el que deban apoyarse.

Pueden construirse en tierra, ponerse después en flotación, transportarlos hasta su ubicación definitiva y fondearlos, o bien construirse a flote y fondearlos.

El esquema de su construcción es, por lo tanto, igual al empleado por los ingenieros portuarios en la realización de muelles de cajones.

Previamente se habrá preparando convenientemente el terreno sobre el que deberán apoyarse, dragando un cierto espesor del mismo, si es necesario, y disponiendo entre éste y el fondo del cajón una banquetta de escollera.

Su principal utilidad puede encontrarse, pues, cuando el terreno de cimentación está constituido por suelos granulares compactos, no susceptibles de ser erosionados por la corriente.

En suelos blandos puede ocurrir que el cajón actúe sobre el terreno con presiones superiores a las admisibles por lo que es necesario un tratamiento previo del mismo. Dragado, vibroflotación o incluso la transmisión de cargas a pilotes, son algunos de estos tratamientos. Es evidente que en este último caso, el cajón no constituye la propia cimentación sino que es una estructura intermedia entre ésta y la pila.

Se emplean fundamentalmente como cimentación de puentes en los que alguna o algunas de sus pilas quedan situadas en la proximidad de la ruta de navegación de barcos de gran tonelaje.

Precisamente para evitar que las pilas pueden sufrir impactos de cierta entidad, éstas se apoyan sobre cajones de este tipo cuya misión es equilibrar el impacto con la resistencia al deslizamiento que opone el contacto banqueta-losa de apoyo. Como consecuencia, las dimensiones resultantes de ésta última, y por lo tanto del cajón, suelen ser bastante grandes.

A modo de ejemplo, en la figura 24 pueden verse esquemáticamente los cajones de este tipo empleados en la cimentación del puente Queen Elizabeth II, que cruza el Támesis a la altura de Dartford (Inglaterra).

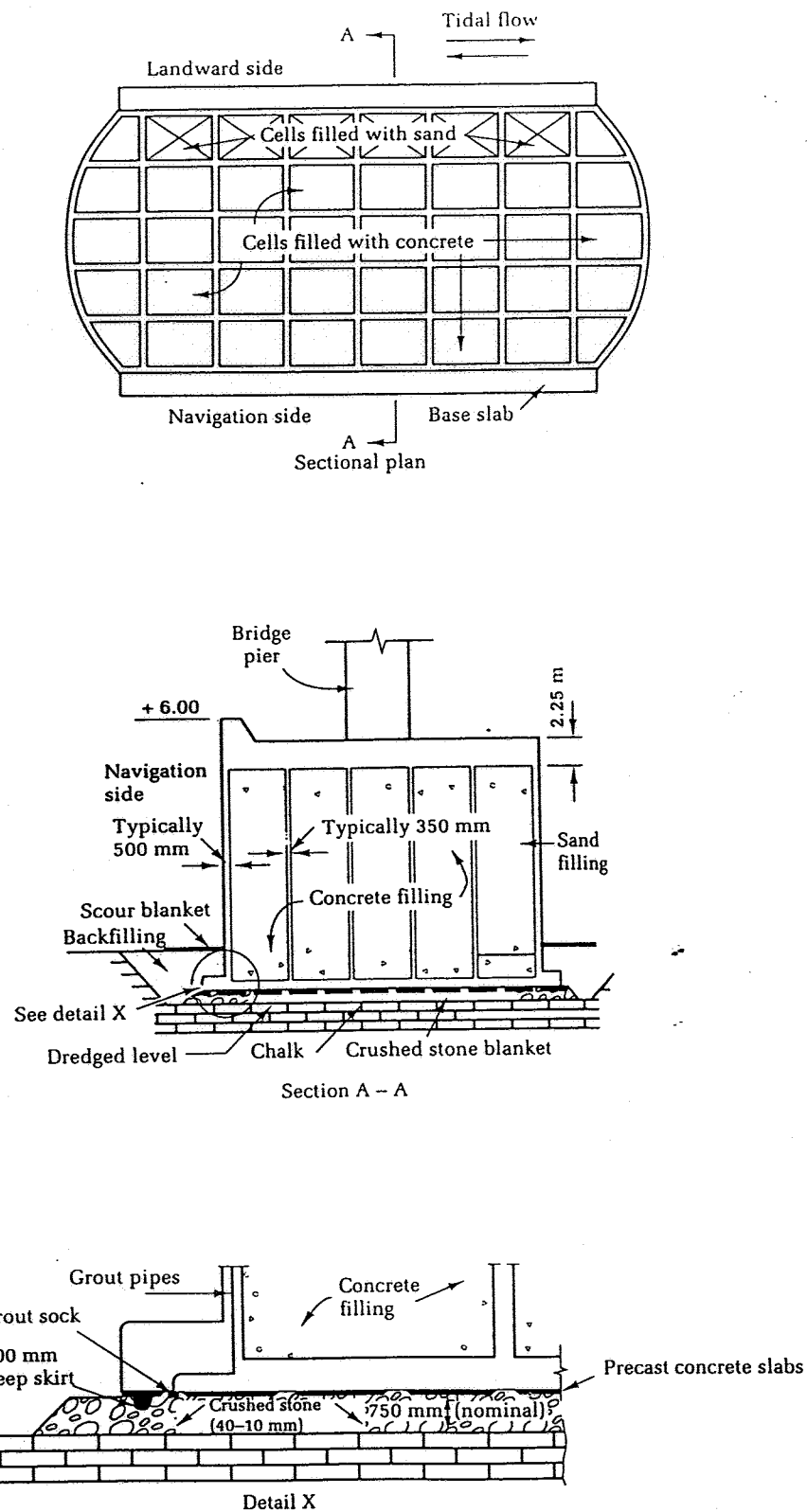


Figura 24. Esquema de los cajones cerrados empleados como cimentación de las pilas del Puente Queen Elizabeth (Inglaterra).